



# R

## EMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS POR CROMO HEXAVALENTE: RELATO SOBRE GERENCIAMENTO DE PROJETO

<sup>1</sup>Rizia Miranda Aguiar

<sup>2</sup>Marcelo Luiz Dias da Silva Gabriel

Recebido: 08/09/2014

Aprovado: 14/11/2014

### Resumo

Com a mudança de abordagem da sociedade em direção a um entendimento mais amplo sobre os limites e restrições impostos a processos e produtos e sobre a consequente necessidade de mitigar danos passados para garantir um presente adequado que não comprometa as gerações futuras este relato apresenta os resultados de um projeto de remediação de área contaminada por cromo hexavalente na cidade de São Paulo, com o objetivo de validar as práticas preconizadas pela literatura e apresentar os resultados advindos da gestão do projeto que, além de seus aspectos técnicos e tecnológicos, contemplasse também o desenvolvimento do método e suas etapas dentro do escopo da Gestão de Projetos. Os resultados encontrados demonstram a eficiência e eficácia do método apresentado e das etapas seguidas na consecução da remediação que permitiram a sistematização do processo na forma de um roteiro. Conclui-se que o exemplo estudado permite aos futuros pesquisadores e profissionais a sua reprodução, constituindo-se em metodologia aplicada com base teórica e empírica.

**Palavras chave:** relato técnico; gestão de projetos; remediação de áreas contaminadas; cromo hexavalente

---

<sup>1</sup> Mestranda pela Universidade Nove de Julho – UNINOVE, Brasil  
Engenheira Civil na Empresa Arcadis Logos S/A, ARCADIS, Brasil  
E-mail: [rizia\\_m\\_a@hotmail.com](mailto:rizia_m_a@hotmail.com)

<sup>2</sup> Professor pela Universidade Nove de Julho – UNINOVE, Brasil  
Doutor pela Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Brasil  
E-mail: [marcelo.gabriel@uninove.br](mailto:marcelo.gabriel@uninove.br)

## REMEDIATION OF HEXAVALENT CHROMIUM IN A CONTAMINATED AREA: REPORT OF A PROJECT

### Abstract

Considering that our society is shifting the approach to a broader understanding about the imposed limits and restrictions on processes and products and the consequent need to mitigate the impacts caused in the past to ensure a decent present and to not compromise the future generations, this technical report presents the results of a project developed in São Paulo city to remediate an area contaminated by hexavalent chromium. The objective aimed was to validate the practices proposed by theory and present the results obtained on the project management including not only its technical and technological aspects but also the method development and the steps taken under the Project Management scope. The results are proving the efficacy and efficiency on the method chosen and the steps performed that led to a comprehensive check list that proved valid on remediation of contaminated areas. This example allow that future researchers and practitioners can reproduce the method, generating a consistent methodology to be applied in similar cases, with theoretical and empirical background.

**Keywords:** technical report; project management; contaminated areas remediation; hexavalent chromium

## 1 Introdução

No âmbito da sociedade, há uma gradual passagem da sociedade produtora de riscos para uma sociedade reflexiva sobre os limites e consequências das práticas sociais e do desenvolvimento, mas ainda de forma restrita quanto à compreensão das ameaças a que está exposta (Jacobi, Günther & Giatti, 2012). Assim, a disseminação de práticas e abordagens técnico-conceituais ganha relevância no sentido de promover o acesso ao conhecimento e propiciar a reflexão dos atores sociais.

As empresas potencialmente geradoras de passivos ambientais estão constantemente se desenvolvendo na criação e investindo em novas tecnologias que visem o melhor gerenciamento, adequada destinação de resíduos e desenvolvimento de técnicas industriais que não utilizem ou que minimizem ao máximo a utilização de materiais potencialmente contaminantes, de maneira a garantir a não geração ou a minimização do impacto causado por esses materiais (Barbieri, 2011; CNTL, 2003).

No Estado de São Paulo em dezembro 2012 havia 4.572 áreas cadastradas pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) como área contaminada sob investigação, contaminadas, em processo de remediação ou remediadas. Do total, 1.925 (42,1%) eram áreas contaminadas sob investigação, 1.320 (28,9 %) eram áreas contaminadas, 985 (21,5 %) estavam em processo de remediação e 342 (7,5 %) eram consideradas remediadas (CETESB, 2013).

Iniciativas para redução, mitigação ou eliminação de contaminantes no solo, na água ou no ar, constituem elementos chave para a gestão ambiental de empresas e governos, ocasionando uma ampla discussão sobre a problemática que envolve a sociedade junto a questões ambientais e sobre a necessidade de produção mais segura e menos impactante ao ambiente. Nas indústrias, dentre os diferentes contaminantes tóxicos que são utilizados em larga escala, estão os metais e semi-metais, tais como mercúrio, chumbo, cromo, cádmio e arsênio. A utilização indiscriminada destes materiais pode ocasionar contaminações no meio ambiente, e gerar riscos à saúde humana, pois alguns desses contaminantes apresentam características carcinogênicas. Por não possuírem características degradáveis, a utilização destes materiais, torna-se um problema de graves consequências quando não existe um gerenciamento sustentável de sua utilização (Franco, 2008).

Com o objetivo de otimizar recursos técnicos e econômicos, a metodologia de gerenciamento de áreas contaminadas é baseada estrategicamente por etapas sequenciais, onde a informação obtida em cada etapa é a base para a execução da etapa posterior. Trata-se, portanto de um procedimento para a identificação, priorização, investigação e cadastramento das informações coletadas nessas áreas. Essas informações visam subsidiar a definição do planejamento e da implantação de medidas de remediação, de controle institucional, de engenharia ou de emergência (CETESB, 2007).

Em 5 de junho de 2013, foi sancionado o Decreto nº 59.263 que regulamentou a Lei nº 13.577, de 8 de julho de 2009, a qual detalha os processos de investigação e remediação de áreas contaminadas no Estado de São Paulo. Em geral, a lei trata da proteção da qualidade do solo contra contaminações e do cadastramento e tratamento de áreas contaminadas. Mas a grande novidade do decreto é que, enfim, sairá do papel o Fundo Estadual para Prevenção e Remediação de Áreas Contaminadas (FEPRAC), fundo de investimento vinculado à Secretaria do Meio Ambiente.

Diferentes mecanismos antrópicos causam a contaminação do meio ambiente por cromo. A maior fonte de contaminação por cromo ocorre principalmente devido a perdas e vazamentos de líquidos que contenham cromo, ou a incorreta disposição de resíduos sólidos, como os subprodutos do cromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_4^{2-}$ ) chamado de lama (Stanin, 2005).

Assim, este relato técnico busca responder à seguinte questão de pesquisa: Como uma tecnologia apontada por uma consultoria ambiental pode contribuir para o sucesso do gerenciamento de um projeto de remediação de uma área contaminada por cromo hexavalente?

O objeto de estudo é uma área contaminada por cromo hexavalente e a organização estudada é uma multinacional holandesa de capital aberto voltada a todas as áreas da engenharia, desde projetos de cunho ambiental até grandes obras de construção civil. A divisão em estudo é específica de meio ambiente com conhecimentos especializados em propor alternativas de engenharia ambiental consultiva, desenvolvendo e integrando soluções e tecnologias para a remediação de áreas contaminadas.

A partir da revisão da literatura sobre tecnologias que são empregadas em projetos de remediação de áreas contaminadas por cromo hexavalente buscou-se avaliar se a adoção do processo proposto se justifica, pois, há o risco da adequação ao cronograma, risco do aumento do custo na alocação de mais recursos e do não atingimento dos objetivos da remediação do

sítio. Adicionalmente pretende-se, ao relatar o processo de remediação, contribuir para a análise de projetos semelhantes.

## 2. Referencial Teórico

Para escolher a abordagem correta, deve-se começar caracterizando o sítio a ser remediado por características geoquímicas, hidrológicas, e meios geológicos, juntamente com a descrição da natureza e distribuição dos contaminantes. Estas características são amarradas juntamente com o modelo conceitual do sítio a ser remediado. Frequentemente, uma modelagem matemática é construída para fazer a descrição mais quantitativa do sítio. Estudos de tratabilidade em laboratório e por vezes em escala de campo também ajudam a facilitar no processo de seleção (Fruchter, 2002).

Outra abordagem que é dada ao gerenciamento de projeto de remediação seja *in situ* ou não, que é um fator determinante na escolha da técnica de remediação a ser empregada, é a questão dos custos que a técnica escolhida terá, esse custo deverá ser mínimo e a sua eficácia deverá ser máxima (Hashim, Mukhopadhyay, Sahu & Sengupta, 2011).

Sendo assim, à medida que aumenta o número de áreas contaminadas por cromo hexavalente, cresce também a importância da avaliação de impactos relacionados aos custos causados pela técnica empregada na remediação destes sítios contaminados. Essa avaliação de impactos financeiros muitas vezes é determinante na escolha da técnica a ser utilizada no processo de remediação do sítio contaminado (Hashim et al., 2011).

### 2.1 Redução de toxicidade do cromo hexavalente

As estratégias de redução para o cromo hexavalente em águas subterrâneas são baseadas no conceito que o cromo trivalente possui toxicidade e mobilidade mínima quando comparado ao cromo hexavalente. Portanto, a redução do cromo hexavalente em cromo trivalente é uma forma de diminuir o risco potencial associado com a contaminação do cromo sem necessariamente, haver uma mudança de sua concentração total. Uma estratégia bem sucedida para efeito de tal remediação deve satisfazer três critérios (Franco, 2008):

- O cromo trivalente recentemente reduzido deve estar na forma inerte para evitar sua reoxidação, ou seja, precipitado ou fixado na matriz porosa do solo;

- Subprodutos indesejáveis da reação de redução do cromo hexavalente não devem ser liberados;
- As condições de oxirredução e acidez do solo devem ser controladas de modo que o cromo trivalente, ou outros poluentes presentes no solo não sejam solubilizados. Além disso, mudanças marcantes nestas condições inibiriam a desejável precipitação do cromo trivalente reduzido.

A remediação de um sítio contaminado por cromo hexavalente utilizando uma técnica de redução da toxicidade do contaminante requer um levantamento das prioridades que o projeto tem, ou seja, as técnicas de remediação que se baseiam na redução da toxicidade são as soluções mais baratas, porém são as mais lentas e ainda devem ocorrer, as condições necessárias para que haja eficácia e eficiência no emprego dessas técnicas, tais como:

- Concentrações não muito elevadas;
- Capacidade do aquífero permanente de fixar, reagir ou precipitar o contaminante;
- O solo deve ser poroso;
- O solo deve ser permeável;
- Aprovação do órgão ambiental do local do sítio contaminado para a utilização da técnica a ser empregada no processo de remediação.

## **2.2 Remoção do cromo hexavalente**

As técnicas de remoção do cromo hexavalente para remediar os sítios contaminados, utilizam princípios hidrogeológicos para realizar a remediação. Essas técnicas consistem na extração da água subterrânea contaminada. O gargalo dessas técnicas está no fato de que toda a água extraída deve ser encaminhada para tratamento em uma estação na superfície, para a posterior destinação, que pode ser a reinjeção da água já livre do contaminante, ou o descarte no meio ambiente após a autorização do órgão ambiental regulamentador do local em remediação.

As tecnologias de remoção do cromo hexavalente por utilizarem de princípios hidrogeológicos para realização da remediação, necessitam de um levantamento minucioso dos aspectos de hidrogeologia que envolvem o sítio contaminado, porém são recomendados

em sítios que contenham solos finos de baixa permeabilidade e heterogêneos, características que podem ser obstáculos na escolha de outras tecnologias.

Com condições heterogêneas de permeabilidade hidráulica, a água subterrânea move-se através de camadas de alta permeabilidade enquanto que a água nas camadas de baixa permeabilidade permanece relativamente imóvel. Os contaminantes que entraram no subsolo e permaneceram lá por décadas, tiveram tempo para migrar para estas camadas de baixa permeabilidade por difusão. Durante a remediação por remoção do cromo hexavalente, a água limpa move-se através das camadas mais permeáveis em uma velocidade relativamente alta e os contaminantes presentes são removidos de forma relativamente rápida devido a processo de purga com água limpa. Ao contrário, a remoção de contaminantes das camadas de menor permeabilidade é limitada por sua difusão para as camadas de alta permeabilidade (Franco, 2008).

O fluxo da água subterrânea com processo de remoção do cromo hexavalente é alterado e o gradiente hidráulico natural é modificado no aquífero. Como resultado, nem toda a água na vizinhança dos poços de extração é tratada, e deve-se fazer teste detalhado de qual é o raio de influência da tecnologia empregada, através deste teste é possível determinar a área limite denominada de zona de captura onde se estabelece um limite onde a água contaminada é remediada. No ponto de estagnação, localizado abaixo do poço de extração ou de injeção, a velocidade em direção ao poço é igualada a velocidade induzida pelo gradiente natural; neste caso a velocidade resultante do fluido será nula e haverá poucas mudanças na concentração do contaminante durante o processo de tratamento. Assim, quando o processo de remediação é interrompido este local de estagnação ainda apresenta contaminação por cromo hexavalente e este é um dos responsáveis pela recarga do contaminante na água subterrânea (Franco, 2008).

### **2.3 Contenção do cromo hexavalente**

As tecnologias de contenção do cromo hexavalente permitem o tratamento in situ da água subterrânea proveniente da pluma de contaminação, estas são projetadas visando o direcionamento preferencial do fluxo da água subterrânea contaminada (EPA, 2000).

A principal tecnologia empregada para a contenção da contaminação por cromo hexavalente são as Barreiras Reativas Permanentes (BRP). Quando a água contaminada flui pela BRP, os contaminantes são reduzidos e mobilizados (Wilkin, Ford & Paul, 2005). No

caso do cromo hexavalente, o metal é reduzido a cromo trivalente na BRP, e é imobilizado via precipitação no meio reativo e, ou na matriz sólida do aquífero. As BRP não são usadas para remediar diretamente a fonte de contaminação sendo, portanto, utilizada somente para interceptação e tratamento da pluma de contaminação.

Uma estratégia bem sucedida para efeito de tal remediação deve satisfazer os seguintes critérios (EPA, 2000):

- A contaminação deve estar no máximo a 15 metros da superfície;
- Delimitação da pluma e conhecimento de sua mobilidade;
- Os solos devem possuir poros não obstruídos;
- Não necessite de controle hidráulico do aquífero.

### **3. Metodologia da Produção Técnica**

Para a realização deste relato técnico, foram adotadas as estratégias de pesquisa bibliográfica, pesquisa documental e estudo de caso.

A pesquisa bibliográfica é fundamental para a concretização de qualquer pesquisa científica. Procura-se conhecer, analisar e discutir um assunto ou problema a partir de um referencial teórico. A pesquisa documental tem como base o uso de documentos como fonte de dados, informações e evidências, colhidos pelo próprio autor, a fim de contribuir para a análise dos problemas. (Martins & Theóphulo, 2009).

Segundo Yin (2001), “um estudo de caso é uma investigação empírica que investiga um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto da vida real”. O estudo de caso abrange do planejamento à coleta de dados e suas análises. Este é um relato de caso que utilizou a metodologia de estudo de caso único, ou seja, apenas um único projeto da consultoria foi alvo de estudo.

A construção deste trabalho seguiu o seguinte roteiro:

- (a) Elaboração da questão de pesquisa;
- (b) Elaboração do referencial teórico base de todo o relato técnico;
- (c) Coleta dos dados a partir da documentação gerada no projeto, sejam documentos eletrônicos em formato de texto, de planilhas de controle, acompanhamento e ainda de laudos analíticos gerados pela coleta de amostras;



(d) Análise dos resultados obtidos a partir dos processos macros descritos no referencial teórico; e

(e) Conclusão do trabalho, inserindo ainda recomendações.

As empresas envolvidas no presente relato não autorizaram a divulgação de seu nome e dos documentos usados para a coleta de dados.

### **3.1 Contexto do Projeto ou Situação-Problema**

Por volta de 1940 teve início a construção de um conjunto de edificações que abrigaram uma indústria de fogões e aquecedores e que posteriormente, a partir de 1973 e até 1997 passou a abrigar diversas unidades produtivas, predominantemente voltadas para o setor metalúrgico. A área alvo do histórico ambiental compreendeu aproximadamente a porção de 3.000,00 m<sup>2</sup> de uma área total de interesse com 50.206,00 m<sup>2</sup>.

Em decorrência de todas essas atividades, diversos materiais químicos, tanto orgânicos quanto inorgânicos foram manuseados e estocados no local, representando um risco potencial de impacto ao subsolo da área. No início do histórico ambiental levantado, a maior parte dessa área estava desocupada, sendo que apenas um dos prédios tinha ocupação por algum tipo de atividade, sendo usado apenas como um depósito para estocagem de produtos prontos (tintas para sinalização viária) e em área afastada da área alvo do presente relato, ocupando uma área reduzida do terreno (2.395,00 m<sup>2</sup>).

Com o objetivo de embasar uma mudança do uso da área, em dezembro de 2002 foi iniciado perante a CETESB um processo de avaliação da qualidade ambiental da área. Em fevereiro de 2003, a CETESB manifestou-se contrária à mudança de uso dessa área, solicitando uma investigação ambiental detalhada do local. Em setembro de 2003, empresa proprietária do passivo protocolou junto à CETESB uma solicitação de revisão da decisão contrária à mudança do uso, apresentando também um cuidadoso levantamento do uso e ocupação do solo no entorno da área de interesse. Esse levantamento mostrou que já havia ocorrido a descaracterização do uso industrial da área. Em novembro de 2003, a CETESB mostrou-se favorável à solicitação da proprietária, entretanto, solicitou complementarmente uma investigação sobre eventuais impactos, conforme seu Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas. Em janeiro de 2004, a CETESB enviou a resposta oficial da reavaliação

de sua consideração inicial, novamente posicionando-se desfavorável à mudança de uso da área. Assim, em junho de 2004 foi definido que seria realizada uma investigação confirmatória com coleta de amostras para avaliação da qualidade ambiental da área com a entrega do plano de amostragem a ser executado. Sendo assim, em agosto de 2004 foi concluído o trabalho de amostragem na área. Entretanto, em outubro de 2004, a CETESB solicitou uma complementação do Plano de Amostragem, o qual foi realizado em sua plenitude.

Com base nos resultados apresentados na época, foi iniciado um trabalho para detalhamento da área específica onde foi identificada alta concentração de cromo total. Essa porção do terreno foi originalmente ocupada por uma marcenaria e, após a desativação da indústria metalúrgica (fogões e aquecedores), passou a ser ocupada por outras indústrias metalúrgicas, inclusive envolvendo processos de cromatação, o que explicaria a existência do cromo.

Desta forma, em março de 2005, uma empresa de consultoria ambiental realizou um trabalho de detalhamento e reamostragem de toda a área em questão, de forma a embasar uma avaliação de risco à saúde humana. Nesse trabalho a consultoria identificou com base nos resultados de sua avaliação de risco, que a ocupação do site por um empreendimento residencial era aceitável do ponto de vista de risco à saúde humana. Os resultados indicaram que a água subterrânea do aquífero raso encontrava-se inadequada para o consumo humano; as medições de metano efetuadas com um equipamento de medição desse gás (Gastech) indicaram que apesar de os teores de metano identificados na área estarem abaixo do LEL (limite inferior de explosividade), esses inspirariam cuidados quanto ao potencial de acumulação em ambientes fechados. O principal resultado desse trabalho foi a identificação de cromo hexavalente, em uma concentração de 4,31 mg/L (limite de intervenção estabelecido pela CETESB era de 0,05 mg/L), em um poço de monitoramento, situado no limite oeste da área.

A fonte desse impacto foi pequeno depósito que armazenava produtos a base de cromo hexavalente. A partir desta fonte, o cromo migrou para o solo, alcançou a água subterrânea e foi transportado no sentido do fluxo subterrâneo formando uma pluma de aproximadamente 1.500m<sup>2</sup>.

### 3.2 Tipo de Intervenção e Mecanismos Adotados

Em 2005, após atividades de investigação acerca da qualidade do solo e água subterrânea, na antiga unidade fabril concluiu-se que o solo acerca da área onde se situava um antigo depósito de matérias-primas, encontrava-se impactado por cromo hexavalente e a água subterrânea impactada por uma pluma de cromo hexavalente de proporções delimitadas.

Neste mesmo ano, com base nos resultados desta investigação, um plano de ação foi protocolado no órgão ambiental, com o objetivo de remediar os compartimentos ambientais impactados por cromo hexavalente identificados na área estudada.

Ainda em 2005, uma das atividades mitigadoras do impacto realizada na área foi a remoção de todo o solo identificado como impactado, o qual foi devidamente classificado de acordo com as normas técnicas e descartado em aterro específico.

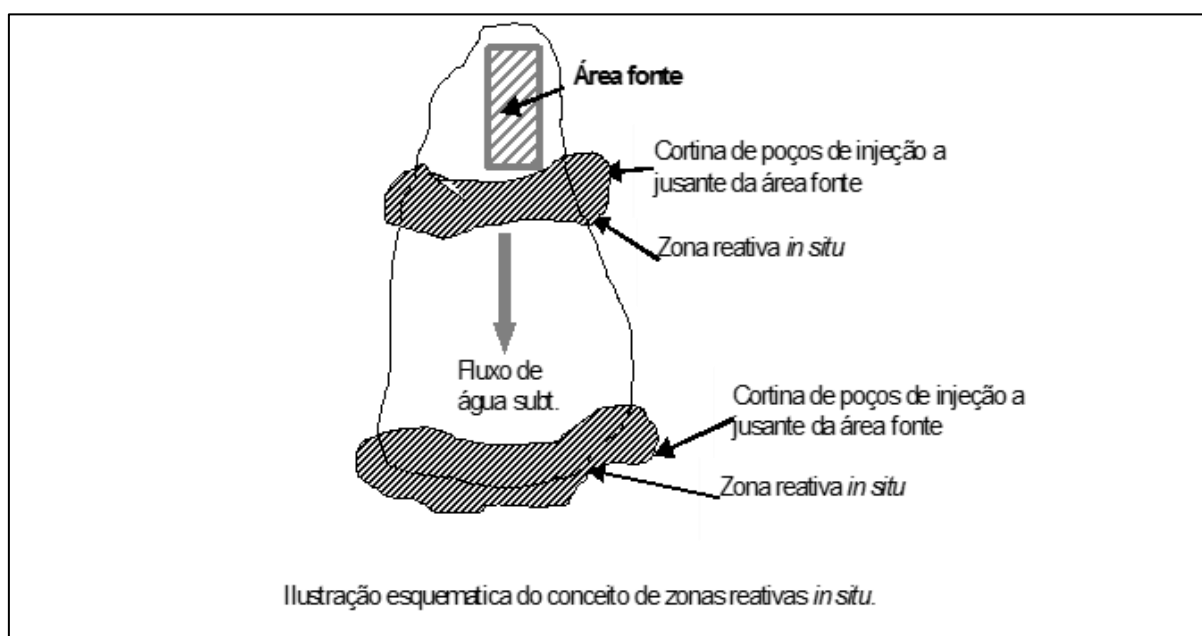
Considerando os resultados das investigações para a escolha da técnica de remediação, esses apresentam os seguintes aspectos:

- O pH identificado na unidade é da ordem de 6,5. Esta condição é fator favorável à precipitação de cromo na forma trivalente;
- Existe presença de bactérias no meio, mesmo nos locais em que se identificaram as maiores concentrações de cromo hexavalente. Apesar do número reduzido de bactérias anaeróbicas, as mesmas podem ser estimuladas através da criação de uma zona redutiva. A estimulação do meio e o tempo de aclimatização das bactérias poderão melhor indicar a eficiência dessa redução *in situ*;
- Existe matéria orgânica no meio em concentrações médias de 20mg/L, que pode ser utilizada como fonte de energia para as bactérias do local;
- A maior concentração de cromo hexavalente identificada na fonte é de 6841 mg/kg para a análise de material sólido (para um valor orientador de 30mg/kg – EPA região-9), e de 7,95 mg/L para a água subterrânea (para um valor orientador de 0,110 mg/L – EPA região-9), podendo ser reduzida com estimulação do meio para ambiente temporariamente mais anaeróbico;
- Existe presença de íons de manganês e ferro, de forma pouco expressiva nos locais amostrados, o que não é condição mais favorável para auxiliar na redução do cromo hexavalente para óxidos/hidróxidos de cromo trivalente;

- A presença de sulfato em concentrações médias da ordem de 20mg/L, e em todas as amostras, significa que o meio tem características aeróbicas e que o cromo hexavalente pode estar adsorvido parcialmente ao sulfato, haja vista sua afinidade para com este íon;

- O litotipo predominante na zona saturada varia entre um silte-arenoso a argila-arenosa. Neste ambiente a velocidade de fluxo, considerando o seu respectivo gradiente hidráulico, é de 6,3m/ano (relativamente baixa), requerendo atenção ao se promover técnicas de bioestimulação de bactérias.

Com base nos resultados das investigações para remediação, implantou-se um teste piloto na área, baseado na técnica de remediação denominada zonas reativas intensas, a qual propõe a redução do cromo hexavalente para cromo trivalente e posterior precipitação do hidróxido de cromo trivalente formado, através de injeções de fonte de carbono que por sua vez, criam um ambiente propício para tais reações, a figura 1 ilustra esquematicamente o conceito da técnica adotada. O teste piloto foi efetuado no período entre junho de 2006 e fevereiro de 2007. Os resultados do teste permitiram concluir que a técnica escolhida para remediação da área era eficaz.



**Figura 1: Esquema da remediação de cromo hexavalente in situ – Zona Reativa in Situ.**

**Fonte:** adaptado de U.S.EPA (2000)

Após um período de solicitação de autorizações para início da implantação do sistema de remediação ao novo proprietário do imóvel e, posteriormente, do contato da CETESB com o novo proprietário, em novembro de 2008 iniciou-se a implantação do sistema de remediação em escala total. No total, foram instalados 18 novos poços de injeção, perfazendo um total de 23 poços para aplicação de fonte de carbono (PI-01 a PI-23). Também foram instalados mais 18 novos poços de monitoramento, sendo 09 destes poços em substituição aos poços que foram destruídos (durante a execução do empreendimento residencial) e os outros 09 poços novos foram instalados com o intuito de complementar o conhecimento das características hidrogeológicas da área e efetuar o monitoramento do desempenho das injeções de fonte de carbono e consequente desenvolvimento da zona reativa.

Um novo levantamento topográfico foi efetuado na área, contemplando os poços antigos e demais poços recém-instalados. A partir do novo levantamento topográfico, um mapa potenciométrico foi elaborado para área. Verificou-se que o sentido preferencial do fluxo d'água subterrâneo é oeste, com componentes sudoeste e noroeste.

Entre janeiro e março de 2009, foi efetuada uma campanha de injeção de fonte de carbono (melaço) e também uma campanha de amostragem através de baixa vazão em poços selecionados para o monitoramento da água, de forma a obter o *baseline* (resultado de base) da área.

Os resultados desta amostragem, efetuada em fevereiro de 2009, forneceram subsídios para avaliação do comportamento da pluma de isoconcentração. Verificou-se que o centro de massa de cromo hexavalente estava próximo aos poços PM-28 e PM-30, que apresentaram valores na ordem de 20 mg/L de cromo hexavalente e que as concentrações na região dos poços que sofreram a influência da zona reativa na área do teste piloto mantiveram-se em concentrações bem inferiores às identificadas antes do processo de injeção e que também foram da ordem de 10 mg/L em 2006 e na amostragem de fevereiro de 2009 estão na ordem de 3,0 mg/L.

#### 4. Resultados Obtidos e Análise

Entre março de 2009 e junho de 2011 foram efetuadas 13 campanhas de injeção de solução de melaço e também 13 campanhas de amostragem da água para o monitoramento do sistema de remediação da zona reativa. Entre julho de 2011 e maio de 2012 foram efetuadas

campanhas de monitoramento da água subterrânea, pós-estabelecimento da zona reativa e redução do cromo hexavalente. Estas campanhas fazem parte do programa de monitoramento para avaliação da eficácia do processo de remediação.

Na campanha de maio de 2012, dos 28 poços monitorados 13 poços tiveram resultados superiores aos valores de intervenção estipulado pela CETESB para cromo trivalente e com concentração decrescente.

Na campanha de outubro de 2012 foram coletadas 20 amostradas de água subterrânea dos poços de monitoramento e em cinco destas amostras foram detectadas concentrações de cromo trivalente e em concentração acima do limite de intervenção da CETESB para cromo. Em nenhuma amostra foi detectada concentrações de cromo hexavalente, corroborando com o histórico da área.

Na campanha de março de 2013 foram coletadas 12 amostras de água subterrânea, nos poços que historicamente apresentavam concentrações de cromo hexavalente e trivalente, para fins de confirmação da inexistência dessa substância novamente. Os resultados analíticos constataram que cromo hexavalente não foi detectado corroborando com o histórico das atividades de monitoramento. O cromo trivalente foi detectado em uma amostra, PM-37, com concentração de 0,587mg/L, próxima do limite de intervenção da CETESB para cromo total (0,50mg/L), o histórico das concentrações de cromo total e hexavalente são apresentados na figura 2.

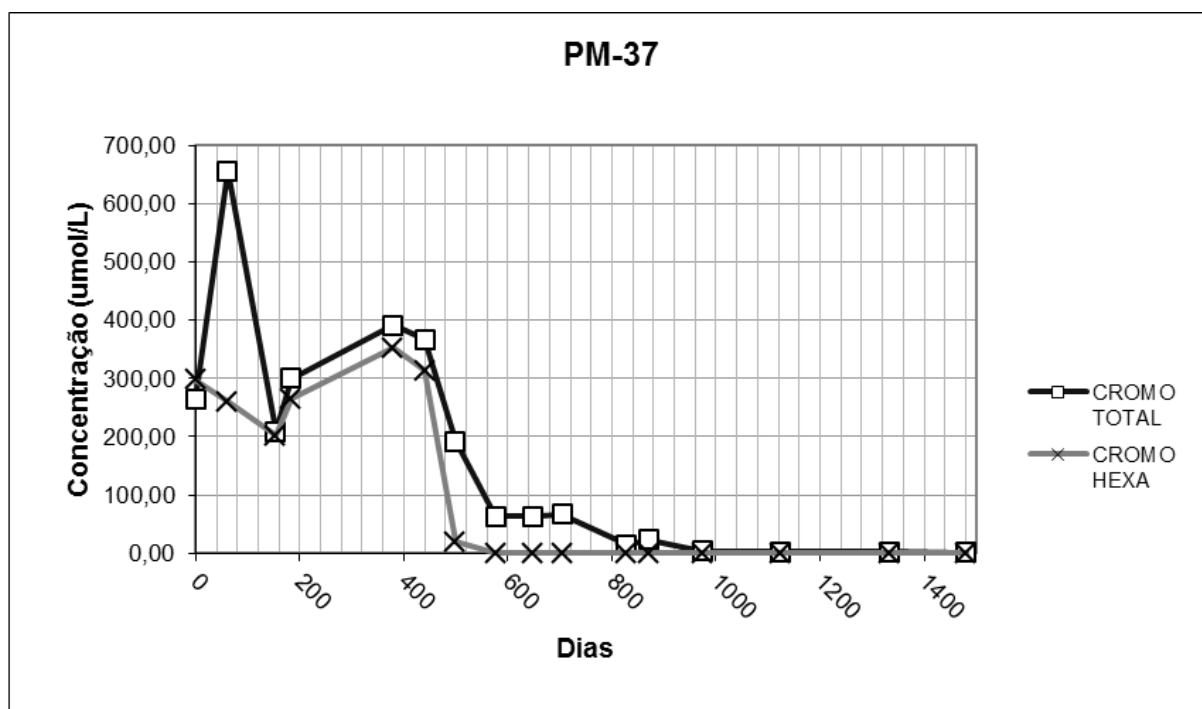


Figura 2: Histórico das concentrações no PM-37 (em µmol/L)

Fonte: elaborado pelos autores

## 5. Conclusão

Diante dos resultados apresentados, pode-se observar a eficácia do processo de redução do cromo hexavalente com a injeção de solução de melaço na água subterrânea após 49 meses que houve redução do cromo hexavalente em 100% dos poços monitorados e precipitação do cromo trivalente em todos os locais monitorados para concentrações abaixo do valor de intervenção da CETESB, exceto na amostra de água do PM-37 que apresentou uma concentração de 0,587mg/L de cromo trivalente, sendo este muito próximo do valor de intervenção da CETESB. Dessa forma, a ocorrência do cromo trivalente ficou reduzida a um local, não remanescendo pluma dessa substância na área de interesse, o que demonstrou que a tecnologia de remediação de precipitação anaeróbica foi eficaz e eficiente em toda a área de interesse da remediação.

Como resultado desta atividade de remediação, evidenciou-se a eficácia do sistema de remediação empregado na área, visto que reduziu a pluma de cromo que em 2009 era predominantemente composta por cromo hexavalente foi reduzida a cromo trivalente num

intervalo de até 24 meses. Após dois anos de monitoramento pós remediação constatou-se que nem pluma de cromo trivalente se evidenciou na área. Por conta disso, entende-se que o processo de remediação local se completou. A apresentação dos resultados deste processo ao órgão ambiental completou todo o projeto de monitoramento solicitado e teve finalidade de encerramento do processo para a reabilitação da área para o uso pretendido, qual seja residencial e comercial tão logo a CETESB emita o parecer de área reabilitada.

Considerando os objetivos e estratégias apresentadas, os critérios para a seleção das tecnologias de remediação mais adequadas à problemática, pode-se recomendar incluir os passos descritos na tabela 1 durante o processo de gerenciamento de um projeto de remediação de uma área contaminada por cromo hexavalente:

<b>Etapa</b>	<b>Descrição</b>
a) Estratégia:	Eliminar as fontes de impacto do local;
	Conter o avanço da pluma;
	Atuar no centro de massa da pluma.
b) Critérios de seleção das tecnologias de remediação:	A seleção das alternativas tecnológicas a serem implementadas bem como os arranjos possíveis deverão considerar o conceito do Ciclo de Vida do Projeto e critérios de seleção.
c) Tempo:	Prazo de aprovação das licenças pelo órgão;
	Necessidade de fase piloto antes da implementação;
	Prazos para alcançar as metas de remediação.
d) Avaliação da eficiência do método:	Capacidade de alcançar as metas de redução do risco ( <i>Site-Specific Target Level</i> - SSTL);
	Eficiência para o tratamento do composto químico;
	Conhecimento suficiente para monitorar o sistema.
e) Viabilidade de implantação:	Acesso na planta para implementação;
	Viabilidade técnica;
	Disponibilidade de equipamentos;
	Sustentável pela planta.
f) Implicações gerais:	Gerenciamento do Risco à saúde humana;
	Geração de resíduos;
	Impactos ambientais;
	Danos à população vizinha.
g) Custos:	Aquisição de equipamentos (mercado interno e externo);



	Implantação e montagem;
	Operação/manutenção.

**Tabela 1: Sugestão de passos para o gerenciamento de um projeto de remediação**

**Fonte:** elaborado pelos autores

## Referências

Barbieri, J. C. (2011). *Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos*. São Paulo: Saraiva.

Brito, G. C. B., & Vasconcelos, F. C. W. (2012). A gestão de áreas contaminadas em Minas Gerais: o licenciamento como instrumento preventivo. *Revista de Gestão Social e Ambiental-RGSA*, 6(2), 19-32.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB (2007). Decisão de Diretoria nº 103/2007/C/E, de 22 de junho de 2007. Dispõe sobre o procedimento para gerenciamento de áreas contaminadas. Acessado em 30 junho, 2013, de: [http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas\\_contaminadas/proced\\_gerenciamento\\_ac.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/proced_gerenciamento_ac.pdf)

\_\_\_\_\_. Texto explicativo, relação de áreas contaminadas e reabilitadas no Estado de São Paulo. Acessado em 23 junho, 2013, de: <http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/areas-contaminadas/2012/texto-explicativo.pdf>

CNTL. **Implementação de programas de produção mais limpa**. Centro Nacional de Tecnologias Limpas SENAI-RS/UNIDO/UNEP (Ed.). 2003. 44p.

EPA. In situ treatment of soil and groundwater contaminated with chromium. **Technical Resource Guide. EPA/625/R-00/005**. Washington, DC. 2000. <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/625r00005/625r00005.pdf> (acessado em julho de 2013).

Fruchter, J. (2002). Peer Reviewed: In-Situ Treatment of Chromium-Contaminated Groundwater. *Environmental science & technology*, 36(23), 464A-472A.

Franco, D. V. (2008). *Tratamento redutivo de solo e água subterrânea contaminados por cromo hexavalente*. (Tese de doutorado). Instituto de Química – Unicamp, Campinas.

Hashim, M. A., Mukhopadhyay, S., Sahu, J. N., & Sengupta, B. (2011). Remediation technologies for heavy metal contaminated groundwater. *Journal of environmental management*, 92(10), 2355-2388.

Martins, G. A., & Theóphilo, C. R. (2009). *Metodologia da investigação científica para ciências sociais aplicadas*. São Paulo: Atlas.

Jacobi, P. R., Günther, W. M. R., & Giatti, L. L. (2012). Agenda 21 e Governança. *Estudos avançados*. 26 (74), 331-339.

Stanin, F.T. (2005). The transport and fate of chromium (VI) in the environment. In: Guertin, J., Jacobs, J.A., & Aavakian, C.P. *Cr (VI) Handbook*. New York: CRC Press.

Yin, R. K. (2011) *Estudo de caso: planejamento e métodos*. Porto Alegre: Bookman.

Wilkin, R. T., Su, C., Ford, R. G., & Paul, C. J. (2005). Chromium-removal processes during groundwater remediation by a zerovalent iron permeable reactive barrier. *Environmental science & technology*, 39(12), 4599-4605.